



Adsorpsi Pb²⁺ Dalam Limbah Cair Artifisial Menggunakan Sistem Adsorpsi Kolom Dengan Bahan Isian Abu Layang Batubara Serbuk dan Granular

Widi Astuti^{1✉}, dan Bayu Kurniawan²

DOI 10.15294/jbat.v4i1.3771

Prodi Teknik Kimia D3, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

Article Info

Sejarah Artikel:
Diterima April 2015
Disetujui Mei 2015
Dipublikasikan Juni 2015

Keywords:
Pb²⁺, adsorption, coal
fly ash, breakthrough.

Abstrak

Batubara merupakan salah satu sumber energi alternatif yang murah. Oleh karena itu, penggunaan batubara di Indonesia meningkat pesat setiap tahunnya. Penggunaan batubara ini menghasilkan limbah yang dapat mencemari lingkungan baik limbah gas seperti CO₂, NOX, CO, SO₂, hidrokarbon maupun limbah padat yang berupa abu layang dan abu dasar. Abu layang mengandung SiO₂, Al₂O₃, dan sisa karbon yang tidak terbakar sehingga potensial digunakan sebagai adsorben. Pada penelitian ini, kemampuan adsorpsi abu layang ditingkatkan melalui aktivasi termal dan diuji untuk menyerap ion Pb²⁺ dalam limbah cair artifisial. Adsorpsi dilakukan pada sistem kolom yang berlangsung kontinyu menggunakan bahan isian abu layang teraktivasi, dalam bentuk serbuk dan granular, pada laju alir influen yang bervariasi. Hasilnya, laju alir mempengaruhi nilai kapasitas (q₀), konstanta thomas (K_{tH}) dan waktu breakthrough.

Abstract

Coal is one of the inexpensive alternative energy. Therefore, the usage of coal in Indonesia has been increased every year. It produces waste that can pollute the environment including gases waste such as CO₂, NOX, CO, SO₂, hydrocarbons and solid waste including fly ash and bottom ash. Coal fly ash is composed of SiO₂, Al₂O₃ and unburned carbon that enables it to act as a potential adsorbent. In this research, the adsorption capacity has increased by thermal activation and used to adsorb Pb²⁺ ion in wastewater. The adsorption was carried out in packed column contains powder and granular activated fly ash. In the system, flow rate was varied. The results show that flow rate influences adsorption capacity, Thomas constant and breakthrough time.

PENDAHULUAN

Bertambahnya industri kelistrikan yang menggunakan batubara sebagai sumber energi mengakibatkan penumpukan limbah abu layang batubara yang relatif besar. Abu layang yang dihasilkan PLTU di seluruh dunia mencapai 500 juta ton per tahun (Ahmaruzzaman, 2010). Di Indonesia, PLTU Suralaya menghasilkan abu layang sebanyak 1.200 ton per hari pada tahun 2002 (Sukandarrumidi, 2006), sementara PLTU Tanjungjati menghasilkan abu layang 14.000 ton per bulan pada tahun 2008 (data primer dari PLTU Tanjungjati). Saat ini pemanfaatan abu layang batubara masih sangat terbatas, sehingga seringkali menimbulkan masalah pencemaran lingkungan yang cukup serius di banyak negara (Sukandarrumidi, 2006). Di dunia, pemanfaatannya rata-rata hanya 16% dari total abu layang batubara yang dihasilkan (Ahmaruzzaman, 2010). Sementara di Amerika Serikat, hanya 30% abu layang batubara yang digunakan dalam industri semen dan konstruksi, sedangkan sisanya dibuang (Apiratikul dan Pavasant, 2008).

Di sisi lain, sejalan dengan pertumbuhan dan perkembangan penduduk, kebutuhan air untuk berbagai keperluan semakin meningkat. Pemenuhan kebutuhan air bersih saat ini sudah menjadi masalah yang cukup serius karena meningkatnya pencemaran air oleh logam berat, seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), krom (Cr), tembaga (Cu), perak (Ag) maupun senyawa organik, seperti benzena, fenol, toluena, naftalena dan zat warna, yang dihasilkan oleh industri-industri elektroplating, pengolahan logam, tekstil, cat, tinta, dan sebagainya. Pencemaran ini menimbulkan beragam pengaruh terhadap manusia dan sangat merugikan karena sebagian besar zat-zat tersebut bersifat karsinogenik (Haryoto dan Wibowo, 2004).

Dilandasi oleh sejumlah fakta tentang bahaya yang ditimbulkan oleh logam berat dan senyawa organik, beberapa metode telah dikembangkan untuk mengatasi pencemaran logam berat dan senyawa organik di perairan, diantaranya presipitasi, ekstraksi, separasi dengan membran (Pak dan Muhammadj, 2006), pertukaran ion (Trgo dkk., 2006) dan adsorpsi (Garg dkk., 2004). Presipitasi merupakan metode yang paling ekonomis tetapi kurang efektif untuk larutan encer. Sementara, pertukaran ion dan separasi dengan membran pada umumnya efektif tetapi memerlukan peralatan dan biaya operasional relatif tinggi. Adsorpsi merupakan salah satu metode alternatif yang menjanjikan karena prosesnya yang relatif sederhana, murah dan dapat bekerja pada konsentrasi rendah.

Adsorpsi merupakan proses akumulasi adsorbat (zat yang dijerap) pada permukaan adsorben (padatan penjerap), yang disebabkan oleh adanya gaya tarik menarik antara molekul padatan dengan material terjerap (fisisorpsi) atau interaksi kimia (kemisorpsi). Metode adsorpsi telah terbukti efektif untuk mengurangi konsentrasi logam dan senyawa organik di perairan, diantaranya menggunakan zeolit (Vucinic dkk., 2002), karbon aktif (Al-Degs dkk., 2008), abu layang (Wang dan Baxter, 2007), sepiolit (Dogan dkk., 2007), peat (Ho dan McKay, 1999) serta bentonit (Hefne dkk., 2008). Adsorpsi dengan menggunakan kayu randu mampu menyerap ion Pb (II) dengan efisiensi mencapai 97,53% (Astuti dan Susilowati, 2014). Namun, adsorpsi tersebut pada umumnya masih dilakukan secara batch dimana adsorben dicampurkan pada larutan yang tetap jumlahnya dan diamati perubahan kualitasnya pada selang waktu tertentu. Berbeda dengan sistem kolom, larutan selalu dikontakkan dengan adsorben sehingga adsorben dapat mengadsorpsi dengan optimal sampai kondisi jenuh yaitu pada saat konsentrasi efluen (larutan yang keluar) mendekati konsentrasi influen (larutan awal). Oleh karena itu, sistem kolom ini lebih menguntungkan karena pada umumnya memiliki kapasitas lebih besar dibandingkan dengan sistem *batch*, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi dalam skala besar. Pada sistem kolom dapat dilakukan dengan dua cara aliran yaitu aliran dari atas kebawah (*down flow*) atau aliran dari bawah ke atas (*up flow*). Pada penelitian ini digunakan sistem *down flow* dimana pengaturan laju alirnya lebih mudah.

METODE

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi AAS, FTIR, dan surface area analyzer untuk analisis dan karakterisasi adsorben kolom adsorpsi, stopwatch, neraca analitik, bak penampung efluen dan influen serta beberapa alat gelas. Bahan-bahan yang digunakan dalam proses adsorpsi yaitu abu layang batubara sebagai adsorben yang diperoleh dari PT. Tanjungjati Jepara, $PbNO_3$ dan akuades.

Preparasi adsorben abu layang

Abu layang diayak menggunakan ayakan 150 mesh, kemudian dicuci dengan akuades. Abu layang yang telah dicuci dimasukkan ke dalam furnace dengan suhu 400°C selama 5 jam. Pada penelitian ini digunakan abu layang serbuk dan abu layang granular yang dibuat dengan penambahan karagenan 20%.

Studi adsorpsi larutan ion Pb^{2+} oleh adsorben abu layang

Abu layang sebanyak 10 gram dimasukkan ke dalam kolom adsorber yang berdiameter 2 cm dengan ketinggian 20 cm. Selanjutnya, larutan Pb^{2+} dengan konsentrasi 50 mg/L dialirkan secara *down flow* ke dalam kolom dengan variasi laju alir 2 dan 3 mL/menit. Sementara, kecederungan konsentrasi efluen setiap jam dipelajari menggunakan kolom dengan diameter 7 cm dan ketinggian 70 cm. Abu layang sebanyak 100 gram dimasukkan ke dalam kolom, selanjutnya larutan Pb^{2+} dengan konsentrasi 100 mg/L dialirkan secara *down flow* ke dalam kolom dengan variasi laju alir 2 mL/menit, 4 mL/menit, dan 6 mL/menit. Sebagai pembanding, juga dilakukan proses adsorpsi menggunakan abu layang granular. Abu layang granular sebanyak 87 gram dimasukkan ke dalam kolom dengan diameter 7 cm, selanjutnya larutan Pb^{2+} dengan konsentrasi 100 mg/L dialirkan secara *down flow* dengan laju alir masuk 6 mL/menit. Pada setiap tahap proses adsorpsi dilakukan analisis kadar Pb^{2+} dalam larutan efluen setiap jam menggunakan AAS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi adsorben

Karakterisasi terhadap adsorben yang digunakan dalam penelitian ini meliputi analisis luas permukaan spesifik menggunakan surface area analyzer dan gugus fungsi. Sampel abu layang serbuk sebelum aktivasi memiliki luas permukaan sebesar 7,883 m²/g, sementara pada abu layang sesudah aktivasi menunjukkan adanya kenaikan luas permukaan menjadi 12,605 m²/g. Hal ini karena pemanasan 400°C dapat mengubah sebagian karbon yang tidak terbakar dalam abu layang menjadi gas CO₂. Reaksi ini meninggalkan lubang-lubang yang dapat meningkatkan luas permukaan. Pada abu layang granular menunjukkan penurunan luas permukaan menjadi 2,984 m²/g. Hal ini disebabkan oleh tertutupnya sebagian pori oleh karagenan yang ditambahkan sebagai binder.

Analisis gugus fungsi juga dilakukan untuk mengetahui perubahan gugus fungsi yang terjadi pada abu layang serbuk, abu layang granular sebelum adsorpsi, dan abu layang granular setelah adsorpsi. Analisis ini dilakukan menggunakan spektroskopi inframerah pada bilangan gelombang 400-4000 cm⁻¹. Pada spektra IR abu layang serbuk teraktivasi terlihat adanya puncak-puncak pada bilangan gelombang antara lain 1738,89 cm⁻¹ yang menandakan adanya vibrasi OH tekukan, pada 1367,08 cm⁻¹ yang menanda-

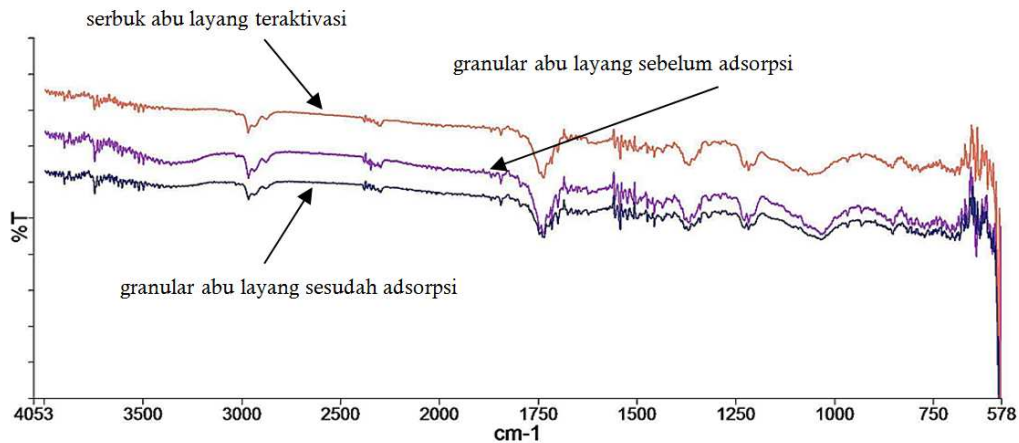
kan adanya vibrasi rentangan asimetris eksternal (Si-O-Si) dan internal (O-Si-O) (Landman, 2003), sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Sementara, analisis FTIR abu layang granular menunjukkan adanya kenaikan persen transmitan dan perpindahan pergeseran serapan dari 1738,89 cm⁻¹ menjadi 1736,07 cm⁻¹. Hal ini menunjukkan adanya penambahan gugus O-H yang berasal dari karagenan. Selain itu juga terlihat adanya puncak baru pada bilangan gelombang 1370.81 cm⁻¹ dan pada bilangan gelombang 1217.27 cm⁻¹ yang menunjukkan adanya gugus S=O, dimana hal ini menunjukkan adanya gugus sulfonat dari karagenan. Sementara pada granular abu layang setelah adsorpsi menunjukkan penurunan intensitas pada bilangan gelombang 1735,28 cm⁻¹, 1370,86 cm⁻¹ dan 1035 cm⁻¹ yang menandakan sisi aktif seperti O-Si-O dan gugus O-H pada abu layang semakin menurun akibat dari proses adsorpsi. Hal ini menegaskan jika adsorpsi yang terjadi merupakan kemisorpsi yang terjadi pada situs aktif yang mengalami penurunan intensitas tersebut.

Studi adsorpsi larutan ion Pb^{2+} oleh adsorben abu layang pada sistem kolom

Adsorpsi abu layang dalam penelitian ini bertujuan untuk menurunkan kadar logam Pb^{2+} yang terkandung dalam limbah artifisial. Sistem adsorpsi yang digunakan merupakan sistem kolom yang merupakan sistem kontinyu yang operasinya selalu mengontakkan adsorben dengan larutan baru.

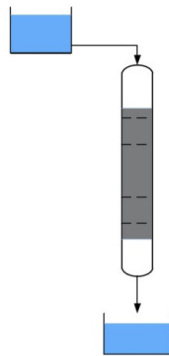
Rangkaian sistem kolom yang digunakan tersaji pada Gambar 2. Model aliran yang digunakan adalah aliran dari atas ke bawah. Pada model ini, limbah akan teradsorpsi secara cepat dan efektif. Lapisan atas adsorben merupakan lapisan tempat terjadinya kontak langsung antara permukaan adsorben dengan larutan berkonsentrasi tinggi (C_0), sementara lapisan adsorben dibawahnya akan menyerap larutan dengan konsentrasi lebih rendah, dan seterusnya. Namun seiring dengan berjalannya waktu, adsorben akan mencapai kondisi jenuh, yaitu kondisi dimana adsorben sudah tidak dapat mengadsorpsi kontaminan terlarut atau dengan kata lain berkurangnya efisiensi penyerapannya sehingga konsentrasi keluar (C_e) pada efluen mendekati konsentrasi larutan masuk (influen).

Pada penelitian ini, laju alir influen dipelajari pada 2 mL/menit dan 3 mL/menit dengan konsentrasi Pb^{2+} dalam larutan influen 50 mg/L. Adsorben yang digunakan sebanyak 10 gram yang dimasukkan ke dalam kolom dengan ketinggian 20 cm dan diameter dalam 2 cm, sehingga menghasilkan ketinggian adsorben abu layang 7



Gambar 1. Spektra IR

cm. Proses adsorpsi dilakukan selama 1320 menit (22 jam) dan larutan effluen diambil setiap 60 menit untuk dianalisis kandungan Pb^{2+} yang tersisa menggunakan AAS. Hasil adsorpsi pada sistem ini tersaji dalam Gambar 3.



Gambar 2. Model Sistem Adsorpsi Kolom

Data pada Gambar 3 menunjukkan bahwa konsentrasi effluen pada setiap jam mengalami kenaikan. Pada laju alir influen 2 mL/menit terlihat bahwa konsentrasi Pb^{2+} pada effluen pada 0-600 menit pertama hampir tidak ada atau dengan kata lain hampir semua ion Pb^{2+} telah teradsorpsi oleh abu layang. Sementara setelah 600 menit, konsentrasi Pb^{2+} pada effluen mulai mengalami kenaikan. Jika dibandingkan dengan laju alir influen 3 mL/menit terlihat bahwa kenaikan konsentrasi ion Pb^{2+} dalam effluen mulai terjadi setelah menit ke-420. Hal ini disebabkan karena pada laju alir yang lebih tinggi maka jumlah ion Pb^{2+} yang masuk ke dalam kolom pada menit yang sama juga semakin banyak. Kenaikan konsentrasi effluen terjadi akibat sebagian adsorben abu layang dalam kolom telah memasuki tahap jenuh sehingga efisiensi adsorpsi abu layang semakin menurun. Jika proses ini dilanjutkan

maka konsentrasi effluen akan semakin mendekati konsentrasi influen.

Untuk mengetahui kapasitas adsorpsi selama proses adsorpsi dapat dihitung menggunakan persamaan Thomas, dengan rumus sebagai berikut :

$$\ln \left[\left(\frac{C_o}{C_t} \right) - 1 \right] = \left(\frac{K_{th} \cdot q_o \cdot m}{Q} \right) - K_{th} \cdot C_o \cdot t \quad \dots(i)$$

dengan :

K_{th} : konstanta thomas (L/mg/menit)

q_o : kapasitas adsorpsi (gr/gr)

m : massa adsorben (gr)

Q : Laju alir (mL/menit)

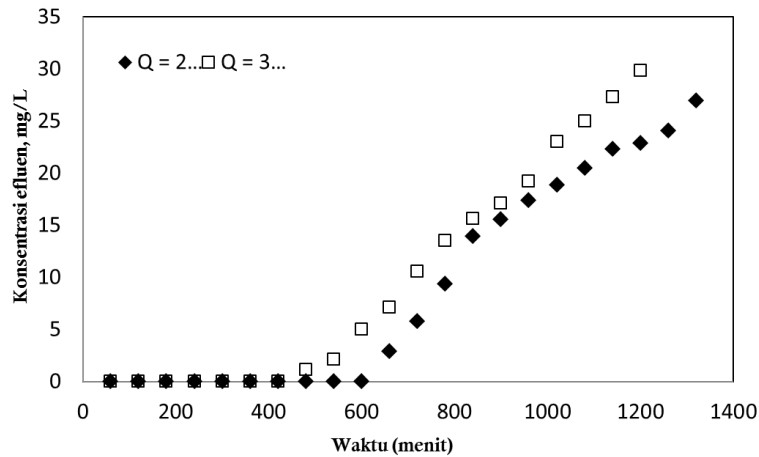
C_o : Konsentrasi awal (mg/L)

t : waktu (menit)

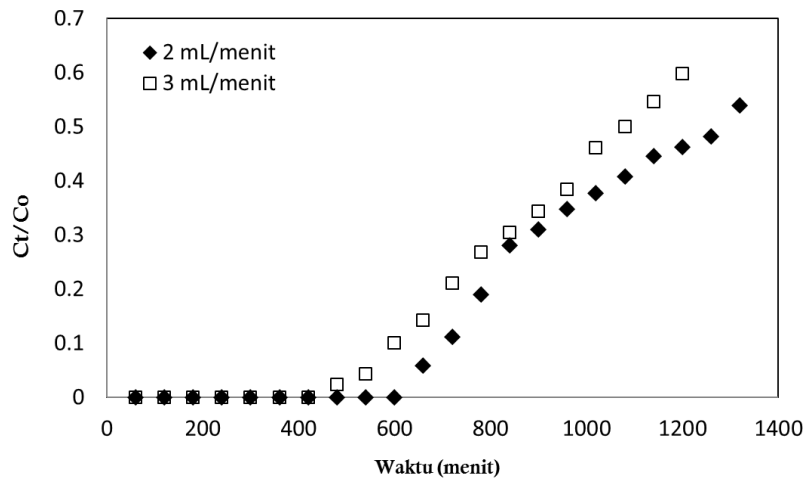
C_t : Konsentrasi keluar (mg/L)

Nilai konstanta K_{th} dan q_o dapat diketahui melalui nilai slope dan intersep persamaan (1). Berdasarkan persamaan tersebut diketahui nilai q_o pada laju alir 2 dan 3 mL/menit berturut-turut adalah 11,51 mg/g dan 15,907 mg/g sedangkan nilai K_{th} pada laju alir 2 dan 3 mL/menit berturut-turut sebesar 0,000088 L/mg/menit dan 0,000104 L/mg/menit. Sementara, kurva *breakthrough* yang diperoleh dari hasil plot nilai C_t/C_o terhadap waktu tersaji pada Gambar 4.

Kurva *breakthrough* pada Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai C_t/C_o terus mengalami kenaikan hingga mendekati 1, yang artinya konsentrasi effluen semakin lama akan semakin sama dengan konsentrasi influennya. Perbedaan laju alir influen akan berpengaruh terhadap waktu *breakthrough* yaitu waktu yang dibutuhkan larutan effluen untuk mengandung ion $Pb(II)$ sebanyak lebih dari 50% dari konsentrasi influennya, yaitu 25 mg/L. Pada laju alir yang lebih tinggi, maka waktu *breakthrough* semakin cepat, akibat dari



Gambar 3. Pengaruh waktu terhadap konsentrasi efluen pada laju alir influen bervariasi



Gambar 4. Kurva *Breakthrough*

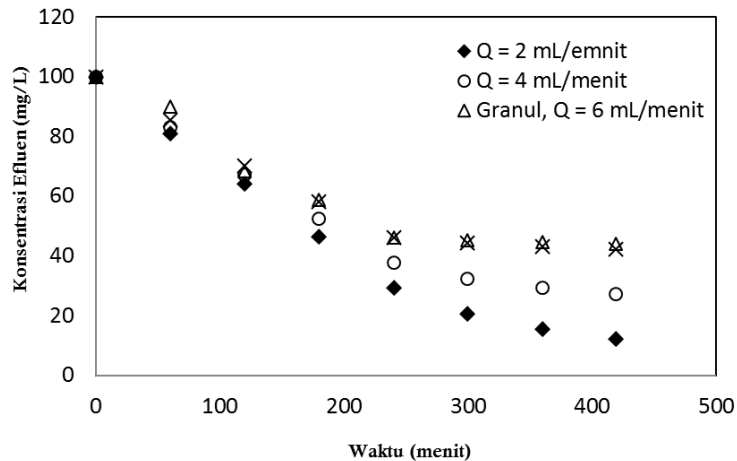
bertambahnya ion Pb^{2+} yang masuk ke dalam kolom per satuan waktu sehingga adsorben pada laju alir yang lebih tinggi menjadi lebih cepat jenuh. Waktu *breakthrough* pada laju alir 2 mL/menit adalah 1300 menit sedangkan pada laju alir 3 mL/menit lebih singkat yaitu 1080 menit.

Pengaruh laju alir dan bentuk abu layang dipelajari menggunakan kolom yang memiliki ukuran lebih besar dengan diameter dalam 7 cm dan diisi dengan adsorben abu layang teraktivasi berbentuk serbuk sebanyak 100 gram yang menghasilkan ketinggian adsorben 7 cm. Proses adsorpsi ini dilakukan selama 420 menit (7 jam) dengan pengamatan konsentrasi efluen setiap 60 menit dengan variasi laju alir 2, 4 dan 6 mL/menit. Sebagai pembanding, kolom juga diisi dengan abu layang granular yang selanjutnya dialiri larutan Pb^{2+} dengan konsentrasi awal 100 mg/L dan laju alir 6 mL/menit. Hasil adsorpsi pada sistem ini tersaji pada Gambar 5.

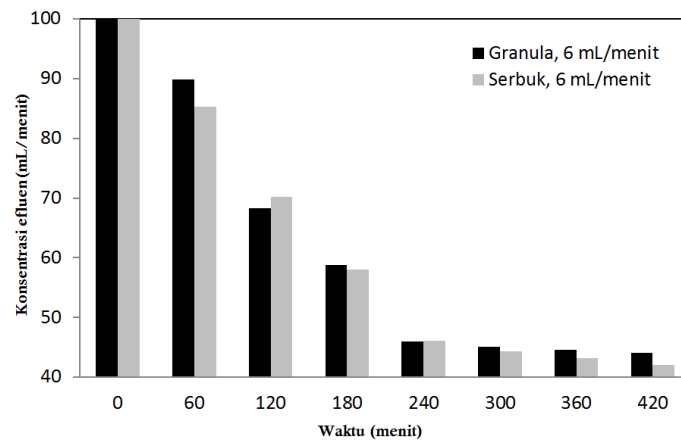
Gambar 5 menunjukkan bahwa tingginya laju alir dapat mempengaruhi jumlah ion Pb^{2+}

yang teradsorpsi. Pada laju alir yang lebih rendah yaitu 2 mL/menit, terlihat penurunan konsentrasi efluen yang lebih besar bila dibandingkan dengan pada laju alir 4 dan 6 mL/menit. Hal ini karena tekanan pada laju alir yang rendah menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan laju alir yang lebih tinggi sehingga waktu kontak antara adsorbat dengan adsorben menjadi lebih besar dan jumlah Pb^{2+} yang dapat teradsorpsi semakin besar.

Bentuk abu layang juga mempengaruhi penurunan konsentrasi Pb^{2+} pada efluen. Pada bentuk serbuk, konsentrasi Pb^{2+} dalam efluen secara umum lebih rendah daripada bentuk granular, sebagaimana terlihat pada Gambar 6. Hal ini dikarenakan pada abu layang berbentuk serbuk memiliki laju difusi yang lebih kecil sehingga secara umum waktu adsorpsi yang diperlukan juga lebih pendek, atau dengan kata lain, pada waktu yang sama, jumlah Pb^{2+} yang dapat dijerap lebih besar sehingga konsentrasi Pb^{2+} pada efluen lebih rendah, meskipun perbedaan penurunan konsentrasi



Gambar 5. Pengaruh waktu terhadap konsentrasi efluen pada laju alir dan bentuk adsorben bervariasi



Gambar 6. Pengaruh waktu terhadap konsentrasi efluen pada abu layang serbuk dan granular

ini tidak terlalu signifikan, seperti yang terlihat pada Gambar 6.

Gambar 5 juga menunjukkan bahwa total penurunan konsentrasi Pb^{2+} selama 420 jam yang lebih tinggi terjadi pada laju alir yang lebih rendah yaitu 2 mL/menit, sebesar 87,8434 mg/L, sementara pada laju alir 4 dan 6 mL/menit penurunan konsentrasi Pb^{2+} berturut-turut sebesar 72,8771 dan 57,9108 mg/L. Hal ini karena pada laju alir yang tinggi jumlah ion Pb^{2+} yang masuk dalam kolom lebih besar sehingga mengakibatkan abu layang menjadi cepat menjadi jenuh.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Laju alir mempengaruhi waktu *break-through* dan kapasitas adsorpsi pada adsorben abu layang, dimana laju alir yang lebih tinggi memberikan waktu *breakthrough* yang lebih singkat dengan kapasitas adsorpsi yang lebih besar.

2. Pembentukan abu layang granular dengan bahan perekat karagenan akan menurunkan luas permukaan dan merubah karakteristik pada abu layang akibat dari penambahan gugus O-H oleh karagenan. Namun kemampuan adsorpsinya untuk Pb^{2+} tidak mengalami penurunan yang signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmaruzzaman, M. 2010. A Review on The Utilization of Fly Ash. *Progress in energy and Combustion Science*. 36 : 327-363.
- Al-Degs, Y.S., El-Barghouthi, M.I., El-Sheikh, A.H., Walker, G.M. 2008. Effect of Solution pH, Ionic Strength, and Temperature on Adsorption Behaviour of Reactive Dyes on Activated Carbon. *Dyes and Pigments*. 77 : 16-23.
- Apiratikul, R., Pavasant, P. 2008. Sorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} Using Modified Zeolite from Coal Fly Ash. *Chemical Engineering Journal*. 144 : 245-258.
- Astuti, W., Susilowati, N. 2014. Sintesis Adsorben Berbasis Lignoselulosa dari kayu randu (*Ceiba*

- pentandra*L.) untuk Menjerap Pb(II) dalam Limbah Cair Artifisial. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*. 3: 53-59.
- Dogan, M., Ozdemir, Y., Alkan, M. 2007. Adsorption Kinetics and Mechanism of Cationic Methyl Violet and Methylene Blue Dyes onto Sepiolite. *Dyes and Pigments*. 75 : 701-713.
- Garg, V.K., Kumar, R., Gupta, R. 2004. Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Solution by Adsorption using Agro Industry Waste : A Case Study of Prosopis Cineraria. *Dyes and Pigments*. 62 : 1-10.
- Haryoto, Wibowo, A. 2004. Kinetika Bioakumulasi Logam Berat Kadmium oleh Fitoplankton *Chlorella* sp Lingkungan Perairan Laut. *Jurnal Penelitian Sains & Teknologi*. 5(2) : 89 – 103.
- Hefne, J.A., Mekhemer, W.K., Alandis, N.M., Aldayel, O.A., Alajyan, T. 2008. Kinetic and Thermodynamic study of the Adsorption of Pb(II) from Aqueous solution to The Natural and Treated Bentonite. *International Journal of Physical Sciences*. 3(11) : 281-288.
- Ho, Y.S., McKay, G. 1999. Batch Lead (II) Removal from Aqueous Solution by Peat : Equilibrium and Kinetics. *Trans IchemE*. 77(B).
- Landmann, A.A. 2003. *Literature Review of Fly Ash in Aspects of Solid-State Chemistry of Fly Ash and Ultramarine Pigments*. University of Pretoria etd.
- Pak, A., Mohammadj, T. 2006. Zeolite NaA Membranes Synthesis. *Desalination*. 200 : 68-70.
- Sukandarrumidi. 2006. *Batubara dan Pemanfaatannya*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta, Indonesia.
- Trgo, M. Peric, J., Medvidovic, N.V. 2006. A Comparative Study of Ion Exchange Kinetics in Zinc/Lead-Modified Zeolite-Clinoptilolite Systems. *Journal of Hazardous Materials*. B136 : 938-945.
- Vucinic D, Miljavonic I, RosicA and Lazic P, 2002. Effect of Na₂O/SiO₂ mole Ratio on the Crystal Type of Zeolite Synthesized from Coal Fly Ash. *J. Serb. Chem. Soc.* 68(6) : 471-478.
- Wang, S., Baxter, L. 2007. Comprehensive Study of Biomass Fly Ash in Concrete : Strength, Microscopy, Kinetics and Durability. *Fuel Processing Technology*. 88 : 1165-1170.